

Ondas Gravitacionais

🌀 O Som dos Buracos Negros 🌀

A Relatividade Geral de Einstein é tida como um dos maiores feitos do pensamento humano, e explica a gravitação em termos de curvatura do espaço-tempo. Uma das consequências mais fascinantes desta teoria é a existência de objectos que são curvatura pura: buracos negros e ondas gravitacionais (ver notícia na página seguinte).

A GALÁXIA

Segunda-feira, 5 de Julho de 2021.

O Som dos Buracos Negros

Cientistas “ouvem” o buraco negro Cygnus X-1, na constelação do Cisne, a devorar uma estrela errante. A descoberta foi hoje oficialmente anunciada por Ayn Stein, porta-voz do LIVIGO, colaboração internacional de mais de mil cientistas. Quando uma estrela cai num buraco negro, este emite ondas gravitacionais, curvaturas do espaço-tempo que viajam à velocidade de 300 mil quilómetros por segundo. “Estas ondas são a voz dos buracos negros, e pela primeira vez conseguimos ouvir um

buraco negro a comer” diz Stein.

Esta descoberta é uma confirmação de uma fantástica previsão do grande físico Albert Einstein: a existência de ondas gravitacionais que se propagam já tinham sido observadas por Hulse e Taylor há muitos anos, feito que lhes valeu o Nobel de 1993. Mas, segundo Ayn Stein, “essa foi uma detecção indirecta, através do efeito das ondas em estrelas muito longínquas”. Esta é a primeira vez que capturamos uma dessas ondas cá na Terra.

I. Gravidade é Curvatura

A notícia reproduzida é completamente falsa, mas o meu optimismo leva-me a prever que dentro de alguns anos algo parecido vai fazer os escaparates dos jornais verdadeiros. Entretanto, centenas de cientistas em todo o mundo trabalham para que isso aconteça. Vamos, então, tentar perceber melhor o que esses cientistas estudam e porque vale a pena fazê-lo.

Tal como as ondas sonoras (o som) ou as ondas electromagnéticas (a luz), as ondas gravitacionais são oscilações que transportam energia. Apesar de as ondas gravitacionais ainda não terem sido ouvidas ou observadas por nós, temos a certeza de que elas existem, como vou explicar. No futuro, a detecção destas ondas vai permitir testar uma previsão de Einstein com quase cem anos, mas, mais do que isso, vai abrir uma janela completamente nova para o universo. Desta janela, vamos poder ver com grande nitidez o coração de estrelas de neutrões e processos violentos envolvendo buracos negros, jactos de matéria, talvez mesmo o início do universo.

Sabemos que o som são oscilações das moléculas do ar, e a luz corresponde a oscilações de campos eléctricos e magnéticos. A que correspondem, então, as ondas gravitacionais? O que é que está a oscilar? Para conhecermos a resposta temos de aprender um pouco sobre a teoria de Einstein.

A teoria da Relatividade Geral de Einstein explica a gravitação como curvatura do espaço-tempo, caracterizando assim a gravitação numa perspectiva geométrica e melhorando a teoria de Newton. Como exemplificado na figura 1, uma massa como o Sol, por exemplo, ou qualquer outro objecto, deforma o espaço-tempo, da mesma

forma que uma bala de canhão se afunda em cima de um trampolim ou de um tecido elástico. Contudo, o que é curvo é o espaço + tempo, isto é, o tempo também deixa de ser algo absoluto. O tempo passa a ter a mesma importância que o espaço: pode dilatar-se, contrair-se, e até torcer-se de forma que a distinção entre tempo e espaço deixe de fazer sentido. O espaço-tempo forma, assim, um todo maleável como um tecido elástico. Existem duas entidades que são feitas puramente deste tecido de espaço-tempo: buracos negros e ondas gravitacionais.

II. *Buracos Negros*

Poucos conceitos são mais populares e discutidos do que o dos buracos negros. Por parecerem exóticos e terem tão pouco a ver com o nosso dia-a-dia, são extremamente «famosos». Um buraco negro é definido por uma fronteira onde o tecido do espaço-tempo é tão deformado que nem a luz escapa. Esta fronteira é conhecida como horizonte de eventos. A razão é simples: como nem sequer a luz consegue sair, nunca podemos ver o que se passa lá dentro. Qualquer acontecimento ou evento que tenha lugar dentro do buraco negro está-nos vedado, isto é, está para lá do nosso horizonte e nunca saberemos nada sobre ele.

Para se atingir esta deformação, tem de se ter uma massa grande numa região pequena. Por exemplo, para tornarmos o nosso Sol num buraco negro teríamos de o comprimir até um raio de 3 quilómetros. Por outro lado, a Terra teria de ser comprimida até cerca de 1 centímetro! Então como é que se formam buracos negros?

Quem ou o que é que esmaga as estrelas até ficarem tão pequenas? A resposta é simples: a gravidade. A gravidade tende a juntar tudo num centro, como aliás se percebe pela figura 1. Por exemplo, todos nós somos «atraídos» para o centro da Terra. A razão pela qual não caímos é a existência de forças de pressão que nos mantêm à superfície. A Terra ou o Sol não caem sobre si mesmos pela mesma razão. Mas existem muitas estrelas onde a pressão não é suficiente para contrariar o efeito da gravidade e elas colapsam sobre si mesmas, formando um buraco negro. Actualmente pensa-se que existam milhões de buracos negros na nossa galáxia. Mesmo no centro da nossa galáxia está um buraco negro com cerca de 4 milhões de massas solares.

Os buracos negros não são aspiradores cósmicos, não sugam tudo à sua volta. Na realidade, se substituíssemos o Sol por um buraco negro, quase tudo continuaria na mesma: a Terra ficaria na sua órbita, imperturbada (existe uma diferença importante: morreríamos de frio!). Para sermos aspirados, teríamos de atravessar o horizonte de eventos do buraco negro.

Dada a sua natureza, os buracos negros não se podem ver. Logo, toda a prova da existência de buracos negros é indirecta (por exemplo, a observação de uma massa muito grande numa região muito pequena). Contudo, os buracos negros «falam» e o som que emitem são as ondas gravitacionais. Num futuro próximo, este «som» pode ser usado para compreendermos estes estranhos objectos.

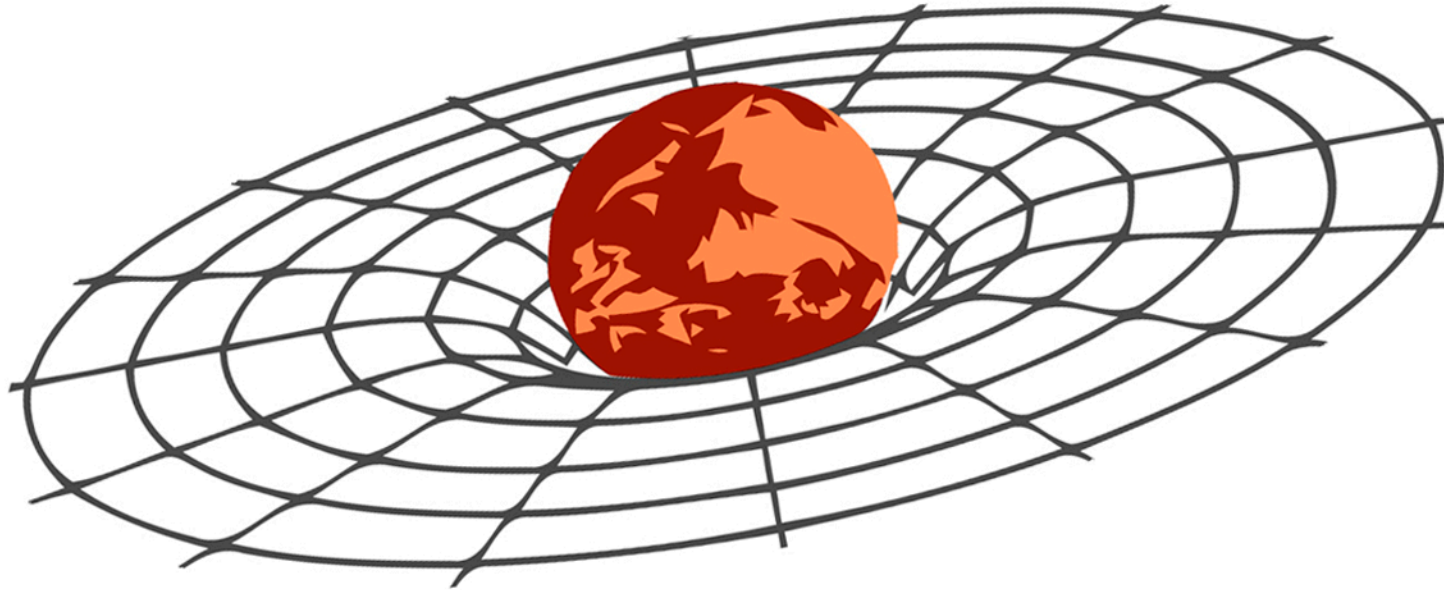


Figura 1 — Esta figura ilustra o espaço-tempo na proximidade de um planeta, cuja massa «estica» o espaço-tempo tal como uma bola em cima de um trampolim o deforma. Trajectórias que no espaço vazio seriam linhas rectas tornam-se «curvas» na vizinhança de planetas. Se fixarmos o tamanho do planeta, a deformação depende da massa: quanto mais massivo, mais curvo se torna o espaço-tempo. É importante lembrar que esta figura serve somente para ajudar a entender a estrutura geométrica da Relatividade Geral e não é uma descrição rigorosa da realidade. De facto, o que é curvo é o espaço-tempo, não apenas o espaço (para além disso, o espaço é tridimensional e não bidimensional como na imagem).

III. Ondas Gravitacionais

A existência de ondas gravitacionais é fácil de entender na analogia da bala de canhão no centro de um trampolim: se a bala estiver parada, nada de especial acontece, mas se por alguma razão a bala for posta em movimento, são geradas ondas que se propagam para fora do trampolim. Se por acaso algum de vocês tiver lá no sótão uma bala de canhão, pode experimentar em casa! Vai ver que as ondas têm uma velocidade característica que depende apenas do tecido do trampolim. Pois bem, as ondas gravitacionais também têm uma velocidade que depende apenas do tecido do espaço-tempo: é igual à velocidade da luz — trezentos mil quilómetros por segundo.

Na realidade, as ondas gravitacionais são necessárias em qualquer teoria consistente da gravidade. Na teoria de Newton, a gravidade é uma interacção instantânea¹. Contudo, em 1905, Einstein propôs — e até agora todas as experiências concordam com este postulado — a existência de uma velocidade máxima no universo, igual à velocidade da luz no vácuo. Qualquer teoria correcta da gravidade tem de levar este facto em linha de conta, algo que a teoria de Newton não fazia. Assim que se admite uma velocidade de propagação finita, tem de se admitir a existência de ondas que transportam informação sobre a interacção.

¹ Uma forma mais clara de entender isto consiste em supor que o nosso Sol desaparece de repente. Na teoria de Newton, todos os planetas passariam imediatamente a sentir os efeitos deste desaparecimento e a seguir trajectórias rectas. Numa teoria consistente com a relatividade restrita, nada se propaga mais rápido do que a luz. Portanto, a Terra sentiria os efeitos deste desaparecimento pelo menos 8 minutos depois de ele acontecer, o tempo que a luz leva a percorrer a distância Sol-Terra.

Em gravidade, elas têm o nome de ondas gravitacionais. Como consequência da teoria de Einstein, as ondas gravitacionais viajam (talvez por coincidência, talvez por elegância das equações) a uma velocidade igual à velocidade da luz. Se um dia se vier a verificar que a teoria de Einstein tem de ser substituída por outra mais sofisticada, as ondas gravitacionais terão sempre de estar presentes (possivelmente com outras propriedades, por exemplo, com uma velocidade diferente).

Em 1918, pouco tempo depois de estabelecer a Relatividade Geral, o próprio Einstein mostrou que as ondas gravitacionais são consequência da sua teoria. Contudo, estas ondas ainda não foram observadas na Terra, apesar de se ter medido o seu efeito em binárias de estrelas de neutrões, como irei referir adiante. O motivo é simples: estas ondas são extremamente débeis e interagem muito fracamente com a matéria. A fraca interacção é muito importante, pois significa que estas ondas conseguem viajar milhares ou milhões de anos-luz até nós, sem se deixarem perturbar nem amortecer por nada: a informação que transportam sobre buracos negros ou estrelas de neutrões, etc., chega até nós de forma pura, incorrupta. Contudo, não há bela sem senão: sendo extremamente difícil de as fazer interagir com um detector, é igualmente difícil (mas não impossível) «vê-las».

IV. *Propriedades das Ondas Gravitacionais*

Para entendermos melhor o efeito destas ondas, é conveniente tomarmos um conjunto de massas-teste dispostas num anel de diâmetro L , tal como na figura 2.

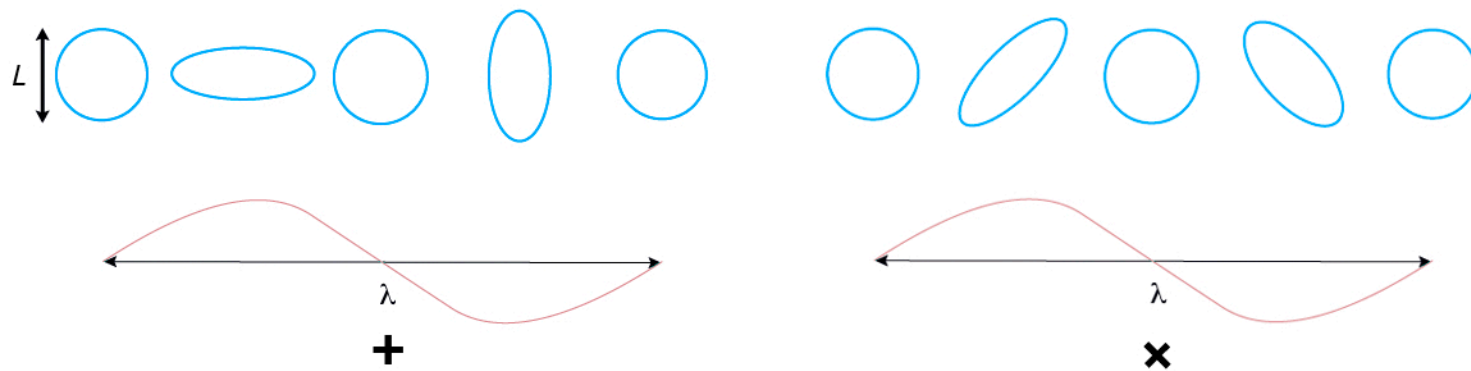


Figura 2 — O efeito das ondas gravitacionais num anel de partículas. A onda propaga-se no plano perpendicular ao plano do papel. Existem dois tipos de polarizações: a «+» à esquerda e a «x» à direita.

Imaginemos uma onda gravitacional de intensidade h a viajar perpendicularmente ao plano desta folha. Quando a onda passa pelo anel, este move-se de acordo com a figura 2 e o movimento depende de um parâmetro da onda chamado polarização, que pode ser do tipo $+$ ou \times . Estes nomes resultam do seu efeito sobre os corpos-teste, como se pode observar na figura. A distância entre duas partículas varia por interacção com a onda. O diâmetro do anel sofre variações δL dadas por

$$\frac{\delta L}{L} = h \quad (1)$$

Esta equação diz-nos duas coisas: quanto maior a amplitude da onda h , maior será a variação no tamanho do anel δL . Além disso, se a onda tiver uma amplitude fixa, então quanto maior o comprimento L do anel, maior será a sua deformação δL . Por exemplo, se $h = 0,001$ e $L = 1$ metro, o anel sofre variações de comprimento na ordem do milímetro. Por outro lado, se $h = 0,01$ e $L = 10$ metros, o anel deforma-se cerca de um decímetro. Vemos que a intensidade h da onda mede o efeito que mencionámos atrás, isto é, quanto é que a trajectória dos corpos se curva no espaço-tempo. Falta ainda saber como calcular h e para isso temos de saber como é que estas ondas são produzidas.

V. Fontes

As ondas gravitacionais são geradas por quase todo o tipo de movimento. Em geral, um sistema de massa M e velocidade v produz uma onda com amplitude²

$$h \sim 7 \times 10^{-44} v^2 \frac{M}{r} \quad (2)$$

onde r é a distância do sistema ao observador que a mede. O número 10^{-44} (43 zeros à direita da vírgula) é extremamente pequeno... Estudemos a equação (2): ela diz-nos que a onda é proporcional à massa do sistema, quanto maior a massa, mais intensa será a onda. O mesmo para a velocidade. Por outro lado, quanto maior a distância ao sistema, *menor* será a amplitude da onda. Isto é familiar: quanto mais afastados de uma TV ou rádio, menos intenso será o som recebido.

Agora vejamos se é possível gerar ondas gravitacionais fortes cá na Terra. Para tal, vamos tomar dois halteres de 1 tonelada cada um e pô-los a girar em torno um do outro 1000 vezes por segundo, numa trajectória circular com 1 metro de raio. Neste caso, a uma distância de 300 km dos carros temos $h \sim 10^{-39}$ (pequeno demais para ser medido!). Parece ser impossível gerar ondas mais fortes na Terra, mas o Universo é muito vasto!

² Aqui, a velocidade v denota uma velocidade típica do sistema. É preciso ter em atenção que movimentos rectilíneos a velocidades constantes não emitem ondas gravitacionais.

VI. *Sistemas Binários de Buracos Negros e Estrelas de Neutrões*

Um dos sistemas mais impressionantes no universo são binárias de buracos negros ou estrelas de neutrões, orbitando em torno do centro de massa. Estes sistemas são geradores eficientes de ondas gravitacionais: são extremamente compactos — nada é mais compacto que um buraco negro — e podem mover-se a grandes velocidades.

Consideremos um sistema deste género composto por dois buracos negros, cada um com uma massa igual à do nosso Sol, o que significa que tem um raio de cerca de 3 km. Suponhamos que o movimento destes dois buracos negros tem um período orbital de 1 hora e que se encontram a 1 kiloparsec³ de distância da Terra. Neste caso temos $h \sim 10^{-21}$, ainda extremamente débil: uma pessoa atravessada por uma destas ondas deformar-se-ia apenas por uma fracção do tamanho de um electrão!

Mas nem tudo está perdido. Como o sistema emite ondas, perde energia. De facto, a energia emitida sob a forma de ondas gravitacionais é igual à que o Sol perde sob a forma de luz. Esta perda faz que o raio e o período da órbita do sistema diminuam com o tempo. Em cada ano, o período encurta-se em cerca de um centésimo de milissegundo. Apesar de ser uma variação muito pequena, é possível de observar! Aliás, esta variação no período orbital já foi medida para uma binária muito parecida com esta. Hulse e Taylor observaram o pulsar PSR 1913+16 durante décadas e as suas medições concordaram com as previsões da Relatividade Geral com uma precisão

³ Um kiloparsec são cerca de 3 mil anos-luz, ou 3×10^{19} metros.

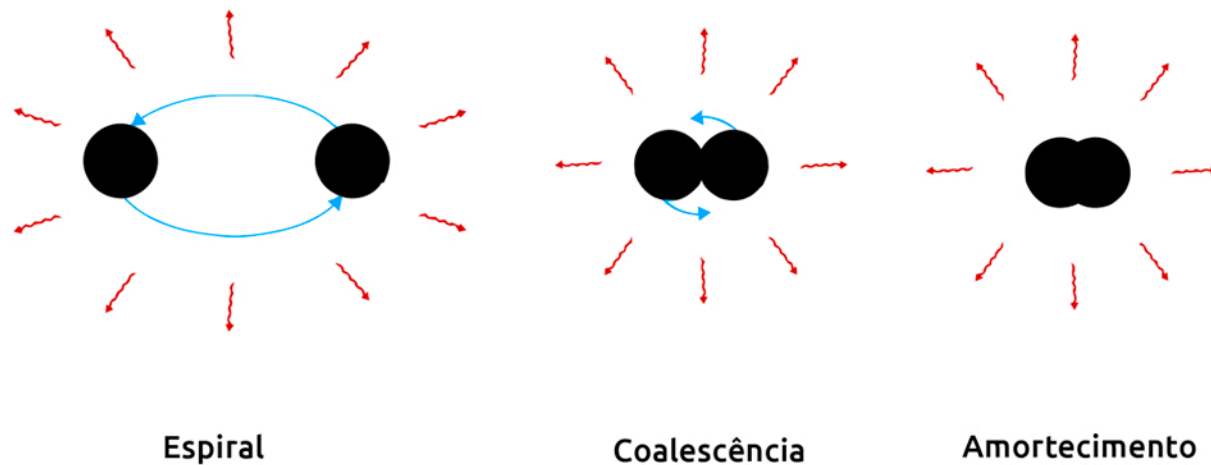


Figura 3 — As últimas fases na vida de uma binária de objectos compactos. Na primeira fase, a «fase espiral», as estrelas ou buracos negros estão bastante separados e orbitam em torno um do outro, emitindo ondas gravitacionais e espiralando lentamente (porque perdem energia). Na fase de coalescência já perderam tanta energia que colidem e dão origem a um único objecto, por exemplo, um buraco negro, o qual vai depois (fase de «amortecimento») emitir ondas parecidas com o toque de uma campânula ou sino.

incrível. As medições foram tão impressionantes que eles receberam o Prémio Nobel da Física em 1993.

À medida que o sistema perde energia e o período orbital diminui, os corpos aproximam-se, num lento espiralar, até que finalmente colidem, dando origem a um único objecto final, naquele que é o processo mais violento do universo. Os componentes da binária PSR 1913+16 vão colidir daqui a cerca de 240 milhões de anos. Este processo tem três fases distintas, ilustradas na figura 3.

Para termos uma ideia mais clara do que estamos a falar, consideremos novamente os nossos dois buracos negros. As dez últimas órbitas antes da colisão demoram cerca de 10 ms. Se pudéssemos observar este sistema a 150 km de distância (quem dera!... Todos os sistemas deste género estão a muitos anos-luz de distância!), seríamos esticados ou comprimidos em 3 milímetros com o passar da onda (ver figura 4). A energia emitida no choque final é enorme e corresponde à energia de cerca de cem mil planetas Terra (ou a um décimo da massa do Sol). A luminosidade (energia por segundo) é simplesmente estonteante, podendo ultrapassar a luminosidade de todo o resto do universo.

VII. Astronomia de Ondas Gravitacionais --- Uma Nova Janela para o Universo

Não vou aqui descrever a complexa, mas elegante, estrutura dos detectores de ondas gravitacionais que funcionam com base no efeito das ondas na matéria (figura 2).

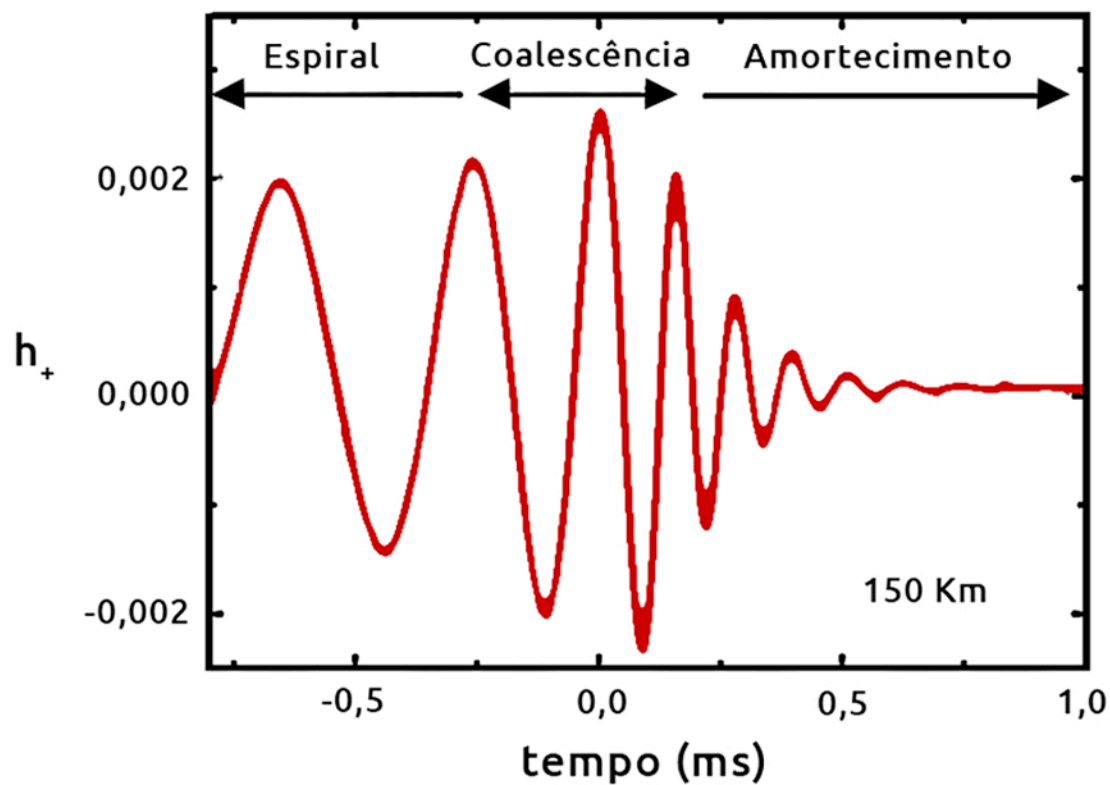


Figura 4 — Onda gravitacional emitida por um sistema de dois buracos negros imediatamente antes e depois de chocarem. O zero corresponde à formação de um único buraco negro final. A onda é vista segundo o plano orbital, a uma distância de 150 km (a amplitude decresce com $1/r$, pelo que a 1500 km de distância será 10 vezes menor). A esta distância, uma pessoa de 2 metros seria esticada ou comprimida em 3 mm com o passar da onda.

Na última década tem havido um grande investimento em detectores de ondas gravitacionais como o LIGO nos Estados Unidos, o VIRGO na Itália, o GEO na Alemanha, o TAMA no Japão, etc. Estes detectores atingiram uma sensibilidade tal que lhes permite detectar ondas com $h \sim 10^{-20}$. Nunca é demais lembrar que isto equivale a conseguir medir variações de cerca do tamanho de um electrão no comprimento de Portugal!

Infelizmente, a amplitude das ondas gravitacionais que chegam até nós é geralmente muito pequena, e por isso ainda não foi detectada nenhuma na Terra. Dentro de cerca de uma década, espera-se que a detecção seja bastante comum. E, daqui a duas décadas, com a entrada em funcionamento de detectores como a LISA, começar-se-á a fazer astronomia de ondas gravitacionais. Temos perante nós o nascimento de uma nova disciplina que nos vai permitir ver um universo inteiramente diferente.

As ondas gravitacionais interagem muito fracamente, chegando até nós «puras», ou seja, nas mesmas condições em que foram geradas. Assim, iremos ver colisões de buracos negros e estrelas de neutrões, ondas que vêm do início do universo, etc, com uma nitidez que a astronomia tradicional não permite. A detecção destas ondas permitir-nos-á finalmente testar a teoria de Einstein: se verificarmos que as ondas têm mais do que duas polarizações ou viajam a uma velocidade menor que a da luz, é possível que a teoria de Einstein tenha de ser melhorada... Quem sabe?

Há tanta coisa interessante para fazer, aprender e descobrir com ondas gravitacionais que aposto que um dos leitores, num futuro próximo, vai conseguir algo muito mais excitante do que a notícia do início.

VIII. Sugestões de Leitura

- [1] Um resumo alargado em português sobre ondas gravitacionais, da autoria de Luís E. Mendes, pode ser encontrado em http://www.portaldoastronomo.org/tema_20.php.
- [2] Para resposta às perguntas mais estranhas que possam ter sobre Relatividade, buracos negros, etc, tentem a página do John Baez em <http://math.ucr.edu/home/baez/physics/>.
- [3] Nos últimos anos, ocorreram desenvolvimentos extraordinários na resolução numérica das equações de Einstein, revistos por V. Cardoso e C. Herdeiro em «Colidindo buracos negros», *Gazeta de Física* 32(1), Fasc. 1, pp8-11 (2009). Um sumário destes acontecimentos está também na minha página pessoal <http://gamow.ist.utl.pt/~vitor/>.
- [4] Uma revisão mais especializada do estado actual da procura de ondas gravitacionais encontra-se em B. S. Sathyaprakash and B. F. Schutz, «Physics, Astrophysics and Cosmology with Gravitational Waves,» *Living Reviews in Relativity* 12, 2 (2009).
- [5] Harry Collins, *Gravity's Shadow: the search for gravitational waves*, (The University of Chicago Press, Chicago, 2001).
- [6] Actualmente, o detector de ondas gravitacionais mais sensível é o LIGO (<http://www.ligo.caltech.edu>).

“Ondas Gravitacionais: O Som dos Buracos Negros”

Vitor Cardoso



Este texto foi publicado pela primeira vez no livro “Nas Fronteiras do Universo”, uma edição do Serviço de Ciência da Fundação Calouste Gulbenkian/Gradiva Publicações, em Janeiro de 2011.

